

レジリエントな地震防災・減災機能を強化する

鉄道バラスト軌道の新技術とシミュレーション

総合情報基盤センター 准教授 奥村 弘

150年の鉄道史において、列車の発展に対し、バラスト軌道はその評価技術の不在により敷設計画・安全性評価・メンテナンス計画などが経験的に実施されてきた。富山大学、東洋道路興業（株）および富山県工業技術センターはバラスト内へ高強度人工ブロックを投入し、コストを掛けずに軌道の沈下を抑制する技術を開発してきた。3次元弾性波伝播解析と実物大模型軌道試験によりバラストの振動変形挙動と道床抵抗力を定量的に解明し、混入するブロックの最適形状を逆問題設計により算出する。これを基にJR貨物の協力を仰ぎ、実軌道上で共同研究者の鉄道総合技術研究所と沈下抑制効果の実証試験を行い、地震時および常時列車載荷重における鉄道安全性を施すバラスト軌道の耐震性最適強化技術確立することを目的として研究開発を進めている。

キーワード：鉄道バラスト軌道、レジリエントな地震防災・減災機能強化技術

1. はじめに

地震による鉄道軌道の被害は、高架橋や盛土などの構造物の変形に伴って軌道にも変形が生じるケースが大半であるが、共同研究者である（公財）鉄道総合技術研究所による過去の被害事例の調査に置いて、構造物や路盤に大きな変状が見られない状況でも、バラスト軌道が大きく変形する場合であることが報告され、さらに、バラスト軌道の変形が主要因となって脱線に至った事例も報告されている。地震によるバラスト軌道の変形は「液状曲り」とも呼ばれ、座屈や著大な通り変位として現れる。液状曲りは橋梁や分岐器の前後など構造変化箇所で発生するケールだけではなく、一般部においても連続した波形として発生する。この液状曲りの発生メカニズムは解明されておらず、まくらぎに対する軌道横断方向の地震動抵抗力である「道床横抵抗力」の評価が重要な課題であり、地震時の列車走行安全性や地震後の復旧を考慮すると、バラスト軌道の地震動に対する性能を評価する必要がある。バラスト軌道は「道床バラスト」と呼ばれる単粒度碎石の集合体から構成される軌道であり（図1）、列車がレール継目等の凹凸部を高速で通過する際には、軸距や台車間隔に起因する数Hzから数十Hzオーダーの低周波の動的

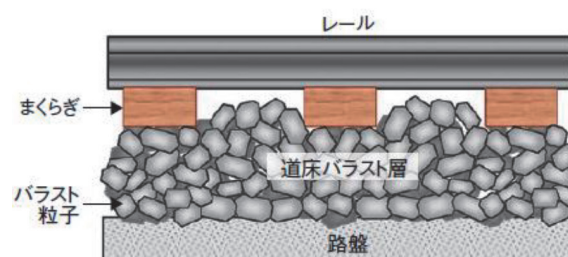


図1 鉄道のバラスト軌道

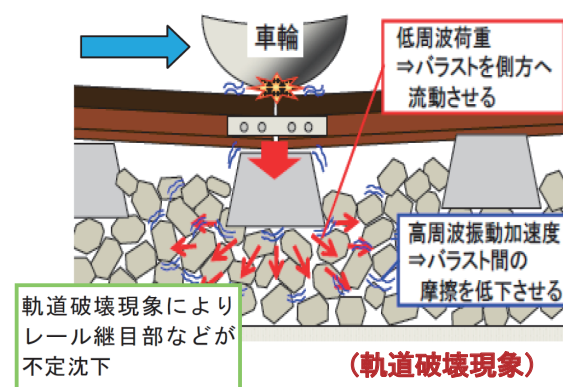


図2 バラスト軌道の不定沈下

荷重と、数百Hzから数kHzオーダーの高周波の衝撃荷重とがまくらぎ下面を介して道床に伝わる。角ばった形状のバラスト碎石からなる道床部は、これらの荷重を稜角部の応力集中と多点接触による応力分散により、路盤が許容しうるレベルまで

効率よく低減させて路盤に伝えるという重要な役割の「道床縦抵抗力」を担っている。しかし、地震動と常時の列車繰返し荷重によるバラストの劣化現象が避けられず、さらには、バラスト碎石の破損・摩耗並びに流動に起因してレールが不定沈下する「軌道破壊現象」（図 2）が避けられない。バラスト軌道破壊の修復・復旧には膨大な維持・補修費が必要であり、バラスト道床のレジリエントな防災・減災機能の強化と振動に対してバラスト道床抵抗力を向上させるハード的対策技術が求められている。このため、地震時の列車走行安全性や地震後の復旧を考慮すると、列車走行常時および地震動を受けたバラスト軌道の 3 次元的な道床抵抗力を評価（ソフト的対策技術）することが重要となる。このとき、地震時変形挙動時の「道床横抵抗力」と列車衝撃荷重時の「道床縦抵抗力」に対する定量的推定では、3 次元的な碎石および碎石集合体の振動・波動特性と微視的な応力・ひずみ分布を解明する必要があるため、バラスト内の波動の伝播解析により、碎石集合体内部への振動および衝撃波の伝達特性に対する高精度な数値解析手法が求められている。

2. 実用化へ向けた動向

本研究開発の目的は、大規模な道床改良工事を必要とせず、高額な固定化工法ではない、安価なバラスト軌道の沈下抑制を行う技術の開発である。本工法が検証できれば、特に軌道の沈下（狂い）が生じやすく問題となっている、レールの継ぎ目部や橋梁、踏切部などのスラブ軌道との切り替わり部、コーナ部の道床改良が可能となる。これは、保線コストの削減が問題となっていながら、施工コストの問題から「省力化軌道」への転換ができない地方営業線や、道床の耐荷重の問題から「省力化軌道」への切り替が困難であった貨物列車の運行する幹線も対象となり、非常に大きな市場がみこまれる。また、振動に強いという特性から、既存バラスト軌道の耐震性向上のメリットも見込まれ、災害に強い国土基盤づくりに寄与するものである。衝撃荷重低減効果を有する高強度人工ブロックを開発し、また、それらの接触構造を改善できると、従来の対症療法に変わり、根治療法的

な対策が可能となり、大幅なコスト削減と効率化が望めるものと予想される。本工法の実証化できれば、年間数千億円規模とされる軌道維持費市場に対し、年間保線作業が行われるバラスト軌道の数%に高強度人工ブロックが採用されるだけでも、膨大な量の高強度人工ブロックが必要となる。このため、東洋道路興業株式会社及び綾羽工業株式会社では、高強度人工ブロックの製造・販売だけではなく、委託製造販売を含め事業化を予定している。また、開発を進めるとともに、綾羽工業株式会社や伊藤忠商事株式会社为中心となり、JR 各社や民鉄を含めバラスト用資材としての市場調査・販路開拓を行うこととしている。なお、バラスト軌道の沈下防止については、国内のみならず海外でも同様に課題となっていることから、伊藤忠商事株式会社が中心となり、海外への販路開拓を推し進めるとともに、鉄道用途以外への高強度人工ブロックの転用・応用も調査を行うこととしている。

鉄道発祥のイギリスをはじめ欧州やアメリカ東部においては古くから、軌道が敷設されているが我が国同様、維持管理の内人件費の占める割合が高くなり、保線コストの増大が問題となっている。また、発展途上国においては、保線技術や軌道管理技術が低く、危険な状態の軌道も少なくないといった問題がある。いずれの地域においても、バラスト軌道については、沈下が避けられず定期的な保線作業が必要であるという認識しか持たれていなかった。高強度人工ブロックをバラスト内に投入するだけで沈下抑制が可能な技術は、これまで、誰も発想しなかった技術であり、バラスト軌道の保線方法としてイノベーションにつながる技術である。本工法が国内の基準規格又は鉄道社内規格として採用されれば、国内の鉄道各社だけでなく、特に海外の英国鉄道（2003 年当時、利益を優先して株主に配当し、軌道の保線を先延ばしするなどバラスト道床の管理を怠っていた。結果、列車が脱線して死亡者が出る事故を含め、軌道管理に起因する事故が頻発した。これにより、鉄道に対する信頼性が損なわれるとともに、多額の対策費用や賠償金の支出により会社は破綻した。現在は、上下分離方式をとり、レールから下部は国で管理し、上は新たな民間企業で運営している）、

欧州鉄道等とも技術協力を取り交わし、維持管理工法の普及を図ることを進めたい。

3. 目指す製品・サービス

本研究開発シーズが実用化を目指す最終的な製品は、大規模な道床改良工事を必要とせず、高額な固定化工法ではない、安価なバラスト軌道の沈下抑制を行う技術の開発である。具体的には、単粒度骨材（バラスト）内へ、立方体形状等の高強度人工ブロックを投入し、コストを掛けずに構造物の基礎の沈下を抑制する技術で、その特許第5156900「単粒度骨材からなる構造物の基礎及びその施工方法」については、東洋道路興業株式会社、並びに富山県工業技術センターと、公益財団法人鉄道総合技術研究所、金沢工業大学が特許を取得している。本研究開発では、この技術を応用し、図3に示すようにバラスト軌道内へ、高強度人工ブロックを投入することにより、軌道破壊現象を低減し、沈下を抑制するものである。この技術については、バラスト軌道への応用として、高強度モルタルに補強繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートを用い、鉄道規格に適合した物性を持った高強度人工ブロックの開発をし(図4)、大型三軸試験や実物大模型軌道試験により高強度人工ブロックの沈下抑制効果を実証してきた。しかし、現状の60mm×60mm×50mmの立方体形状が最適な形状であるかは判明していない。開発するシミュレーションにより、立方体形状に限らずどのような形状・サイズのブロック形状が最も効果的であるかを解明する。これにより、より費用対効果の高い高強度人工ブロック投入工法の開発に期待できる。本工法の具体的なメカニズムについては、列車通過時にバラスト層に伝わる衝撃荷重が高周波の成分を多く含んでいるため、バラスト同士および、バラストと高強度人工ブロックの接触箇所のばね特性により、衝撃荷重の高周波成分が低減する効果を定量的に把握し、シミュレーション技術による解析結果と、軌道における衝撃減衰効果が一致することが証明できれば、軌道破壊現象のメカニズムが解明され、本技術の理論的な信頼性を高められる。

バラスト軌道は、在来線，新幹線共に広く採用

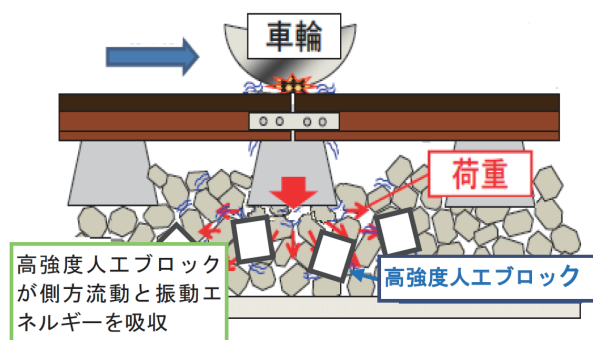


図3 直方体形状物をバラスト内に混入



図4 高強度人工ブロック（例）

されており、そのいずれにおいても「軌道破壊現象」が発生しており、鉄道事業者はその対応に追われている。レールの沈下は列車運行の安全性はもちろん、乗り心地や正確な列車運行を左右するため、日々の運行を確保した状態で維持しながら、更に夜間作業において軌道の維持・補修を行わねばならない。保線作業は典型的な、労働集約的作業であり、作業員の高齢化が進み熟練した修繕作業員の確保が難しいなど、労力面でもコスト面でも限界に達しているといえる。また、軌道沈下を防止する対策工に関しても、従来、軌道劣化のメカニズムが解らなかったため、高額な費用をかけてバラスト軌道をコンクリートや樹脂で固める固定化工法など対症療法的な処置しかできなかった。このため、都市部の旅客営業線の一部のみ固定化工法が採用されているだけで、バラスト軌道の大部分を占める地方交通線や貨物列車等の通過する幹線では、コストや耐荷重の問題から固定化工法の施工は難しい状況である。

4. 社会情勢の変化

少子高齢化が進む我が国において、交通インフラをどのように維持していくかはますます重要となってくる。モータリゼーションという言葉が使われて半世紀近く経過しているが、鉄道が果たす役割は、都市圏内の短距離旅客輸送、都市間の長距離旅客輸送はもちろん、自動車に比べ CO2 排出量が 1/10 といわれる貨物運輸や、地方鉄道の地域貢献度からも必要不可欠とされている。鉄道路線の維持管理においては、橋梁やトンネルの維持管理はもちろんであるが、レールが引かれた軌道そのものの維持管理が現在でも問題となっている。軌道の点検については、軌道走行と同時に計測・試験可能な「Easti」と呼ばれるような軌道総合検測車で点検を行っている。しかし、レールの沈下補修やバラストの交換作業といった保線作業は、施工箇所によって環境や状況が異なり、施工条件も現場に応じて多種多様であることから未だ機械化が難しく、保線作業員による人的作業である。また、現在高学歴化が進むおり、汚い、きつい、危険な 3K 作業を敬遠する労働志向傾向が顕著になりつつあり、更には作業員の高齢化が進み、熟練した修繕作業員の確保の難しさが一層進むと思われる。

平成 21 年度の国土交通白書では、社会資本の将来の維持管理・更新費の推計が示されている(図 27)。この推定では、2010 年度以降の投資総額を今まで通りとした場合、2037 年度には維持管理・更新費が投資総額を上回るとされている。この状況は、鉄道インフラも同様であり、建設時期から見れば上記白書のインフラより老朽化が進んでいるとみられる。更には従来にまして列車の高速化が進み、今後ますます保線作業が増えコストが増大することは明白である。収益が見込める大都市圏の旅客営業線であれば、大規模な修繕や改修が可能であるが、多くの地方営業線では、部分的な回収すら困難であり、対処療法的な保線作業で運行を続けていかなければならない。財政的な面からみて、収入の大幅な増収が見込めない中で、いかに保線コストを低減し、安全性を確保していくかが、今後我が国の鉄道の課題である。この中で、数千億円/年の規模のコストを掛けて実施して

いる、保線コストを半減できる技術が実施できれば、その分の費用を他の部分の維持管理や、収益の改善に回すことができる。

住民の生活に必要な社会的インフラを継続的に維持していくことが必要であり、「定時性」「安全性」に優れた地方鉄道を 10 年後の社会においても保有し続けることが大切である。仮に路線廃止となれば、高齢者や児童・生徒といった交通弱者への影響だけではなく、中・長期的には沿線地域の地域づくり・まちづくりに与える影響も大きい。

本研究開発は、鉄道軌道の「軌道破壊現象」と呼ばれるバラスト沈下メカニズムを解明し、高強度人工ブロックをバラスト内に混入させるだけといった簡単な方法で、軌道の沈下を抑制し、保線コストの半減を目指すものである。従来のバラスト軌道の沈下は、バラストを固めない限り不可能であるという既成観念に対し、まったく新たな着想から、単純かつ低コストで、バラスト軌道の保線コストの低減に貢献する。今後、社会的インフラのメンテナンスとそのコスト低減が重要な中で、鉄道の保線コストの低減に関し、大規模な工事を必要とせず、不定沈下を低減できる本技術は革新的である。鉄道軌道の保線技術については、国内のみならず海外でも問題視されており、これら技術は、世界的にも広く展開する可能性が高いと考える。

5. 事業化の波及効果

バラスト軌道は日本国内だけでも 20,000km 以上の敷設延長があり、在来線においては、新設軌道以外はほぼすべてがバラスト軌道である。それらを全てにおいて、「軌道破壊現象」が発生し、その対策が必要となる。JR をはじめ鉄道事業者が、軌道の維持管理に要する費用は、鉄道全事業費のおよそ 5~10% 近くにもなる。これは、我が国だけでも毎年数千億円の規模であり、その巨費が軌道を補修することのためだけに使われ、無駄に浪費されていることになる。軌道破壊現象の根治療法ができれば、それらの経費の支出は大幅に減額することが可能である。これまで、バラスト軌道は固めなければ沈降するものだという、固定

概念を覆す物であり、鉄道業界へ与えるインパクトは、国内外を含め大きいものがある。海外においても、鉄道線路の大多数はバラスト軌道であり、我が国と同様に軌道破壊の問題は顕著であり、有効な施策が打てないでいる。国内外共に将来的な市場は非常に大きいと考えられる。

さらに、本工法が検証できれば、特に軌道の沈下（狂い）が生じやすく問題となっている、レールの継ぎ目部や橋梁、踏切部などのスラブ軌道との切り替わり部、コーナ部の道床改良が可能となる。これは、保線コストの削減が問題となっていながら、施工コストの問題から「省力化軌道」への転換ができない地方営業線や、道床の耐荷重の問題から「省力化軌道」への切り替が困難であった貨物列車の運行する幹線も対象となり、非常に大きな市場がみこまれる。また、振動に強いという特性から、既存バラスト軌道の耐震性向上のメリットも見込まれ、災害に強い国土基盤づくりに寄与するものである。衝撃荷重低減効果を有する高強度人工ブロックを開発し、また、それらの接触構造を改善できると、従来の対症療法に変わり、根治療法的な対策が可能となり、大幅なコスト削減と効率化が望めるものと予想される。本工法が実証化できれば、年間数千億円規模とされる軌道維持費市場に対し、年間保線作業が行われるバラスト軌道の数%に高強度人工ブロックが採用されるだけでも、膨大な量の高強度人工ブロックが必要となる。このため、東洋道路興業株式会社では、高強度人工ブロックの製造・販売だけではなく、委託製造販売を含め事業化を予定している。なお、バラスト軌道の沈下防止については、国内のみならず海外でも同様に課題となっている。

6. おわりに

鉄道以外の本技術の展開として、バラスト内の高強度人工ブロックの挙動解明と沈下抑制効果・地盤反力係数等の確認ができれば、道路構造分野の設計、建築物分野への応用も期待できる。通常のアスファルト舗装は、アスファルト層の下に、耐荷重を分散させるため、バラスト軌道と同様に、クラッシャーラン（人工碎石：粗骨材）が敷き詰められている。しかし、まくらぎを介して荷重が

掛かる軌道と異なり、舗装道路に関しては耐久性・耐荷重性から、クラッシャーランを隙間なく突き固め（転圧）して施工されている。一方、都市部ではアスファルト舗装による、ヒートアイランド現象や、ゲリラ豪雨による浸水が問題となっている。このため、透水性舗装の普及が進められており、透水性歩道の路盤材には、隙間を残し透水性のあるクラッシャーラン（人工碎石：粗骨材）が用いられ、上記問題の解決に至っている。しかし、車道については、上記のように耐荷重の問題から隙間なく転圧する必要があるため、透水性の舗装を施工しようとしても、クラッシャーランで止水されてしまうことから、施工できないといった問題がある。このため、車道においては排水性舗装が主流であり、透水性アスファルト舗装を用いた工法の例は殆ど無い。これは、耐久性・耐荷重の問題から路盤材として適当な材料が無く車道の透水性舗装の普及には至っていないのが現状である。本来は、鉄道だけのバラスト碎石を使用としているが、本技術は道路舗装の路盤工に転用出来る可能性は高く、上記の問題解決に貢献できるものとする。

また、東日本大震災における復旧困難な被災路線では、軌道を撤去し路線のバス専用道路化によるバス代行運転を行っている路線があるが、軌道撤去の際に発生するバラストは産業廃棄物として処理が必要である。JR東日本の災害対策本部では、このバラストをリサイクルし、道路路盤材としての利用したいとしている。しかし、クラッシャーランと異なり、レール・まくらぎを撤去したバラスト軌道上に直接アスファルト舗装した場合、バラストの移動が抑制されず舗装強度が得られないが、本技術を展開し、バラスト内に高強度人工ブロックを混入させ耐久性・耐荷重性の高い路盤を構築できれば、廃棄バラスト材の有効利用が図られる。また、軌道上のバラストを撤去せずに、そのまま路盤材として利用し、アスファルト舗装が可能となるほか、アスファルトを撤去すれば、高強度人工ブロックを混入させたまま、鉄道軌道への復帰も容易であり、被災地域に貢献できる技術展開が図られる。